

# 油罐的抗震设计和计算

陈冠卿

美国石油学会油罐规范API650先发布了附录P, 在近一、二年又略加更动发布附录E〔1, 2〕。附录E可能是目前最完整的油罐抗震规范。本文除对该规范做出介绍外, 并对其曲线的来源、公式的推导和分析, 做些介绍。

## 一、倾覆力矩的计算

地震时, 水平方向的地震力对于罐的底倾覆力矩可按式计算〔3, 4〕:

$$M = ZI (C_1 W_s x_s + C_1 W_r H_r + C_1 W_1 x_1 + C_2 W_2 x_2) \quad (1)$$

式中:  $M$ ——倾覆力矩, 磅·英尺;

$Z$ ——与地震烈度有关的地区系数, 与罐的所在地区有关;

$I$ ——重要性系数, 一般取  $I = 1$ , 当罐破坏后会引起严重后果时可取  $I$  大于 1, 但不超过 1.5;

$C_1, C_2$ ——侧向地震力系数;

$W_s$ ——罐壳总重量, 磅;

$x_s$ ——由罐壳的重心至罐底的距离, 英尺;

$W_r$ ——罐顶总重 (固定顶或浮顶) 加上可能产生的雪载, 磅;

$W_1$ ——与罐壳共同运动的那部分储液的有效重量, 磅;

$H_r$ ——罐壁总高, 英尺;

$x_1$ ——由罐底至  $W_1$  重心的距离, 英尺;

$W_2$ ——一次振型晃动储液的有效重量, 磅;

$x_2$ ——由罐底至  $W_2$  重心的距离, 英尺。

在式 (1) 中将水平地震荷载分成两部分, 第一部分为罐壳、罐顶及与其共同运动的一部分储液在地震时产生的冲击荷载, 第二部分为在地震时, 地震波中的长周期成分与储液产生共振而引起的晃动荷载, 只考虑第一振型。

在式 (1) 中侧向地震力系数  $C_1, C_2$  均为美国地震烈度最大地区, 在地震时冲击质量和晃动质量的水平加速度与重力加速度  $g$  的比值。

美国根据地震危险的程度 (考虑地震可能发生的频率和烈度), 将全国划分为四个危险区。1 区 (较少危险区) 相当于地震烈度的 5~6 度, 2 区 (中等危险区) 相当于地震烈度的 7 度, 3 区 (较大危险区) 相当于地震烈度的 8 度及 8 度以上, 4 区相当于 3 区的地震烈度并邻近活动断层。  $C_1, C_2$  系根据 4 区而得出的。根据建罐地区的不同, 要对  $C_1, C_2$  进行修正。地区系数  $Z$  即为这个修正系数, 建罐在 4 区时, 即建在烈度最大地区时, 则  $Z$  等于 1, 不必进行修正。

我国与美国一样采用 12 分度的地震烈度表。烈度的判据是从人的感觉、工程反应和地质反应三方面综合确定的, 油罐所在地区的地震烈度按我国国家地震局出版的《中国地震烈度区划图》的规定采用, 该图是从长期地震预报角度出发编制的我国各地未来百年内的烈度分布图。分别以大于或等于 10、9、8、7、6、小于 6 来标示我国各地未来百年内的地震基本烈度。一般工程抗震范围为

7、8、9三度地震烈度区。从经济角度考虑，9度以上地震区应避免基本建设。地区系数Z值见表1。

地震系数 Z 表1

地震危险区	1	2	3	4
相当于我国的地震烈度	5~6	7	≥8	≥8,且邻近活动断层
地区系数 Z	0.1875	0.375	0.75	1.0

$$C_1 = 0.24,$$

$C_2$ 与场地土及储液的固有周期有关，当储液的固有周期 $T < 4.5$ 秒时，

$$C_2 = \frac{0.30S}{T} \quad (2)$$

当储液的固有周期 $T > 4.5$ 秒时，

$$C_2 = \frac{1.35S}{T^2} \quad (3)$$

当储液的固有周期 $T = 4.5$ 秒时，按式(2)和(3)求出的数值相同。

式中： $S$ ——场地土系数；我国和美国的场地土分类如表2所示；

$T$ ——储液的自振周期，秒。

场地土分类 表2

	我 国	美 国
I 类 $S=1.0$	稳定岩石	基岩、类页岩或结晶岩(剪切波速度 $V_s > 2500$ 英尺/秒)，或者硬土(厚度 $< 200$ 英尺的稳定砂沉积层)
I 类 $S=1.2$	除I、II类场地土外的一般稳定土	深的未固结土或硬粘性土(厚度 $> 200$ 英尺的稳定砂、砾石或硬粘土沉积层)
II 类 $S=1.5$	饱和松砂、软塑至流塑的轻亚粘土、淤泥和淤泥质土、冲填土以及其他松软的人工填土等	软至中硬粘土或砂，可以含有或不含有砂或其他未固结的土的夹层

两国分类基本上相类似，故可参照上表选用 $S$ 值。当建罐地区场地土状况难以确定或所设计的油罐可能置于各种不同的场地时，则取 $S = 1.5$ 。

自振周期 $T$ 可按式计算：

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega_i}$$

式中： $T_i$ ——第 $i$ 次振型的周期，秒；

$\omega_i$ ——第 $i$ 次振型的振动次数，次/秒；

$$\omega_i = \left[ \frac{g}{R} \varepsilon_i \operatorname{tgh} \left( \varepsilon_i \frac{H}{R} \right) \right]^{1/2}$$

$g$ ——重力加速度，英尺/秒<sup>2</sup>；

$$g = 32.2 \text{ 英尺/秒}^2$$

$R$ ——油罐半径，英尺；

$H$ ——液面高，英尺；

$\varepsilon_i$ ——与振型次数有关的系数，见表3。

$\varepsilon_i$ 与 $i$ 有关系数 表3

$i$	$\varepsilon_i$	$i$	$\varepsilon_i$
1	1.841	6	18.015
2	5.331	7	21.164
3	8.536	8	24.311
4	11.706	9	27.457
5	14.863	10	30.601

由于第一振型大约能吸收95%的能量，故计算时只需考虑第一振型便足够精确。如只考虑第一振型，则由表3得出 $\varepsilon_1 = 1.841$ ，这样便可求出API-附录E给出的公式和曲线。

$$T = KD^{1/2} \quad (4)$$

$$K = \frac{0.578}{\left[ \operatorname{tgh} \left( \frac{3.67}{\frac{D}{H}} \right) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中： $D$ ——油罐内径，英尺。

附录E将 $K$ 值绘出曲线，见图1。

式(1)中的 $W_1, W_2$ 可按以下方法求出。

$W_1$ 为在地震时由于地震波中的短周期成分与罐体共同运动的那部分储液的重量。并不是全部储液均与罐体共同运动，如 $W_T$ 为储液总重，则 $W_1 < W_T$ 。

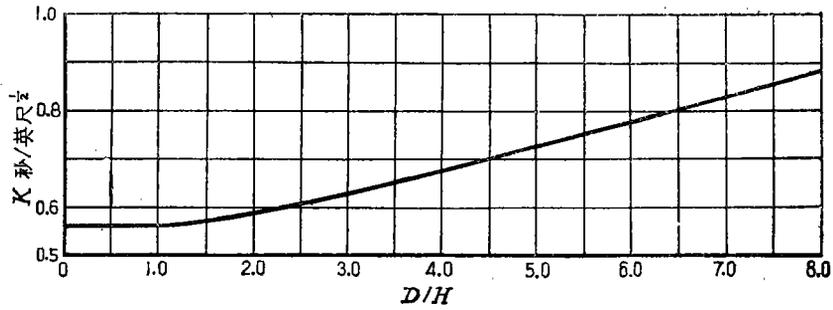


图1 D/H与K的关系

$W_1$ 与 $W_T$ 的关系可按下式求得：  
当 $D/H > 1.333$ 时，

$$\frac{W_1}{W_T} = \frac{\operatorname{tgh}\left(0.866 \frac{D}{H}\right)}{0.866 \frac{D}{H}} \quad (6)$$

当 $D/H < 1.333$ 时，

$$\frac{W_1}{W_T} = 1.0 - 0.218 \frac{D}{H} \quad (7)$$

$W_1/W_T$ 可按图2上的曲线求出，由曲线可看出在 $D/H = 1.333$ 处有一折点。

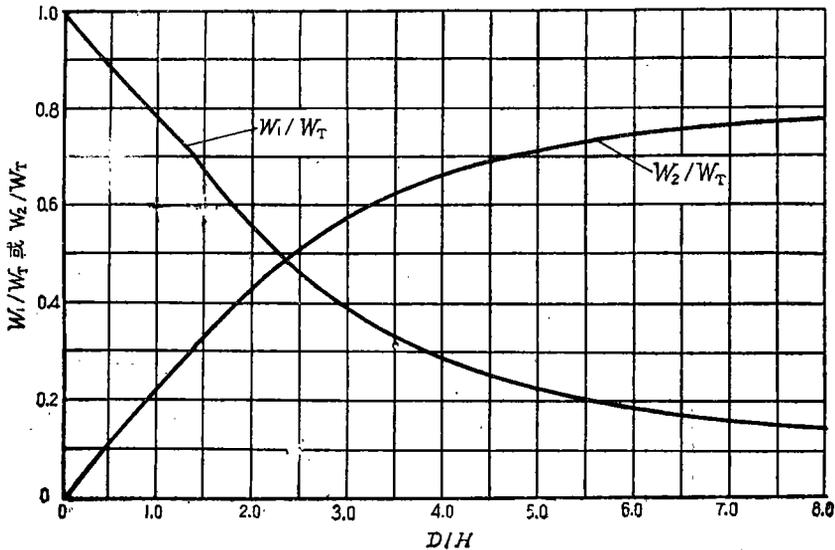


图2

式(6)、(7)是根据Housner的理论推导出的。当罐径与液高之比大于1.333时， $W_1/W_T$ 有式(6)的关系。但当罐径与液高之比小于1.333时，则下部高度的一部分储液，在考虑冲击荷载时可视为刚体，而上面的部分仍可按式(6)计算，据此可推出式(7)。

$W_2$ 为在地震时，由于地震波中的长周期成分与储液产生共振而使储液产生晃动的那部分重量，并不是全部储液均发生晃动，

在地震的那一瞬间只有部分储液参与了晃动，故 $W_2 < W_T$ 。其关系按下式求得：

$$\frac{W_2}{W_T} = 0.23 \frac{D}{H} \operatorname{tgh}\left(\frac{3.67}{H} \frac{D}{H}\right) \quad (8)$$

同样 $W_2$ 也可由图2求出。

由图2可看出， $D/H$ 越大，即罐趋向于矮粗则 $W_1$ 越小而 $W_2$ 越大。由于地耐力的限制，油罐的高度有一定界线。对于大型油

罐，为增加容积只能增加直径，故大型油罐  $D/H$  较大。根据统计，1万立方米或更小的油罐  $D/H$  小于2，1万~4万立方米之间  $D/H$  为2~3，5万~11万立方米之间  $D/H$  为3~4，13万立方米以上  $D/H$  大于4。油罐容积越大则与油罐一致运动的那部分储液，即  $W_1$  所占比例越小，而晃动的那部分储液，即  $W_2$  所占的比例越大。

$W_1$  与  $W_2$  的分布见图3，由图中可看出  $W_1$  的重心在  $0.5H$  以下，即  $x_1 < 0.5H$ ，而  $W_2$  的重心在  $0.5H$  以上，即  $x_2 > 0.5H$ ， $x_1$  和  $x_2$  可按以下方法求得：

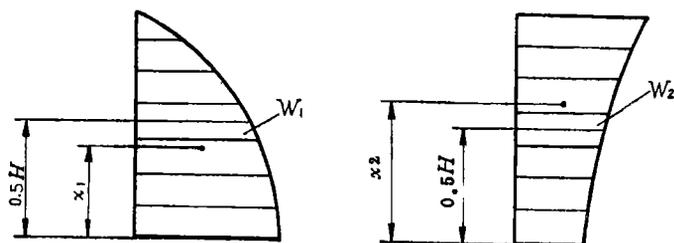


图3

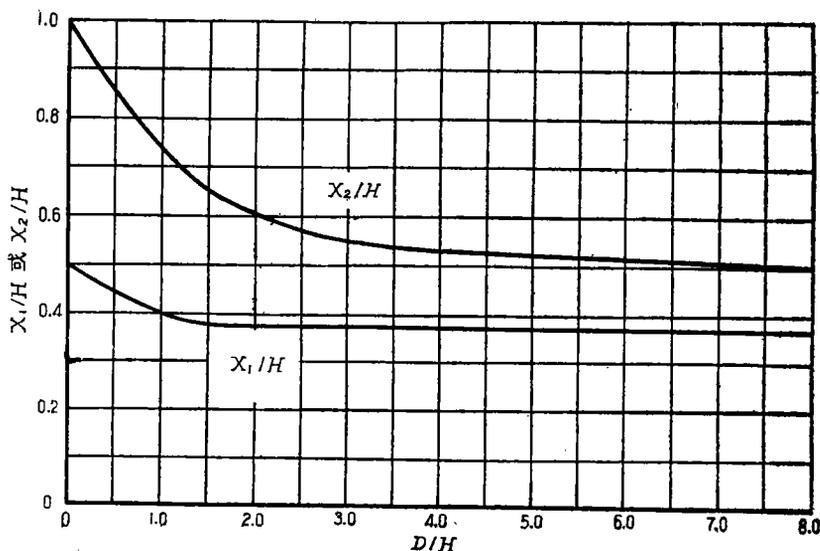


图4

当  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  均求出后便可按式(1)求出倾覆力矩  $M$ 。在  $M$  中罐壁重  $W_s$  和罐顶重  $W_r$  所产生的力矩只占总力矩的3~5%，如计算精度要求不高时可将这一部分忽略不计。

当  $D/H > 1.333$  时，

$$\frac{x_1}{H} = 0.375 \quad (9)$$

当  $D/H < 1.333$  时，

$$\frac{x_1}{H} = 0.5 - 0.094 \frac{D}{H} \quad (10)$$

$$\frac{x_2}{H} = 1.0 - \frac{\cosh\left[\frac{3.67}{H} - 1.0\right]}{\frac{3.67}{H} \sin\left[\frac{3.67}{H}\right]} \quad (11)$$

$x_1$ ,  $x_2$  也可按图4求出。

## 二、罐壁压应力的计算

在倾覆力矩  $M$  作用下，使罐壁一侧受拉，一侧受压。受压侧受力的大小主要取决

于受拉侧是否会被抬起。当受拉侧被抬起时，储液倒向受压侧，使该侧压应力迅速增加，见图5。在计算罐壁受压侧压应力的大小时，首先要判断受拉侧是否会被抬起，在此压应力作用下罐壁是否会失稳屈曲。

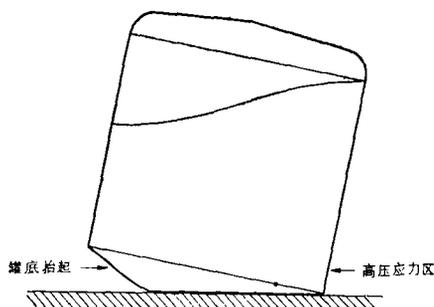


图5

如前所述，在倾覆力矩作用下，罐壁一侧受拉，另一侧受压，其应力值为：

$$\frac{M}{S_f} = \frac{M}{0.785D^2t} \quad (12)$$

式中： $M$ ——倾覆力矩，磅·英尺，  
 $S_f$ ——断面系数，英寸<sup>3</sup>，  
 $D$ ——油罐直径，英尺，  
 $t$ ——下层壁板厚度，英寸。

若 $b$ 为单位周长上的力（压或拉，磅/英尺），

$$\text{则} \quad b = \frac{M}{S_f}t$$

并可得出下式：

$$b = \frac{M}{0.785D^2} \quad (13)$$

阻止罐底抬起的力有两方面，一为罐壳本身的重量，可用 $W_1$ 表示，单位为磅/英尺。 $W_1$ 包括罐壁的重量，如为拱顶罐时还包括罐顶的重量。另一方面，罐中一部分储液也起到阻止罐底抬起的作用。这部分力可用 $W_L$ 表示，其数值与罐底边缘板 $t_b$ 的厚度和材质有关，可按下式求得〔1, 4, 5〕：

$$W_L = 7.9t_b\sqrt{F_{by}GH}$$

储液中抵抗倾覆力矩的那部分液体重量 $W_L$ 可按下列方法求得。取罐底一根宽1英寸、高为边缘板厚 $t_b$ 的梁，该梁一端与罐壁连接处为刚接（转角为零），另一端由罐壁向中心距离 $L$ 处（该处与地面接触不抬起）为铰接。罐底被抬起时梁的最大弯矩处形成两个塑性铰。梁的荷载、弯矩及变形如图6所示。根据平衡条件可求出 $W_L$ 及 $L$ 〔见式（14）〕。

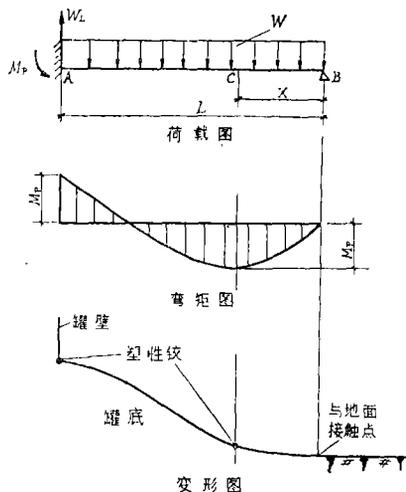


图6

考虑整根梁的平衡，对B点取矩：

$$M_p + \omega \cdot L \cdot \frac{L}{2} - W_L \cdot L = 0$$

取部分梁AC为自由体并对A点取矩：

$$M_p - \omega(L-x) \cdot \frac{L-x}{2} + M_p = 0$$

取部分梁CB为自由体并对B点取矩（见图7）：

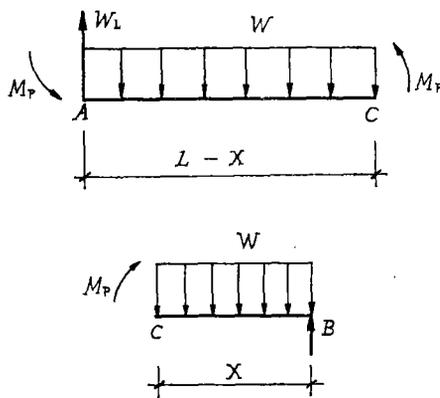


图7

$$M_p - \omega \cdot x \cdot \frac{x}{2} = 0$$

$$W_L = 2 \sqrt{M_p \omega}$$

$$L = 3.414 \sqrt{\frac{M_p}{\omega}}$$

$$\text{因 } M_p = F_{by} \cdot \frac{t_b^2}{4},$$

$$\omega = 62.4GH.$$

代入得:

$$W_L = 7.90 t_b \sqrt{F_{by} GH} \quad (14)$$

$$L = 0.216 t_b \sqrt{\frac{F_{by}}{GH}}$$

$$= 0.0274 \frac{W_L}{GH}$$

由式(14)求得的 $W_L$ 值不得大于1.25GHD。

式中： $W_L$ ——可用来阻止在倾覆力矩作用下罐底抬起的单位罐壳周长上的储液重量，磅/英尺；

$t_b$ ——罐底边缘板的厚度，英寸；

$F_{by}$ ——罐底边缘板钢材规定的最小屈服极限，磅/英寸<sup>2</sup>；

$G$ ——储液的设计比重；

$M_p$ ——矩形截面梁塑性铰处的弯矩，磅·英寸/英寸；

$\omega$ ——单位面积上的液压，磅/英尺<sup>2</sup>；

$L$ ——边缘板的宽度，英尺。

边缘板的厚度 $t_b$ 不得超过底层壁板厚度或不小于1/4英寸。当边缘板比底板的其余部分厚时，则边缘板的宽度应等于或大于 $0.0274 \frac{W_L}{GH}$ 。

由式(14)看出，边缘板越强即 $t_b$ 越厚，则 $W_L$ 越大，从而使罐底板不易抬起，但 $t_b$ 越大，则作用于底层壁板的边缘应力也越大，故 $t_b$ 不应无限制的加厚，而应按上述原则取值。

当按式(12)或(13)求出的上抬的力小于 $W_i$ 与 $W_L$ 之和时，则罐底不会被抬起，相

反，大于 $W_i$ 与 $W_L$ 之和时，则罐底将被抬起。可写成如下的判据：

$$\text{当 } b = \frac{M}{0.785D^2} \leq W_L + W_i \text{ 时,}$$

罐壁受拉侧的罐底不会被抬起；

$$\text{当 } b = \frac{M}{0.785D^2} > W_L + W_i \text{ 时,}$$

罐壁受拉侧的罐底将被抬起。

在API 650附录E中，根据罐底是否会被抬起以及被抬起的程度按以下不同的情况求出 $b$ 值：

$$1. \quad \frac{M}{D^2(W_i + W_L)} \leq 0.785 \text{ 时,}$$

$$b = W_i + \frac{1.273M}{D^2} \quad (15)$$

式(15)即简单的压、弯柱的计算公式。

$$2. \quad 0.785 < \frac{M}{D^2(W_i + W_L)} \leq 1.5$$

时， $b$ 可按图8求得。

$$3. \quad 1.5 < \frac{M}{D^2(W_i + W_L)} < 1.57 \text{ 时,}$$

$b$ 可按下式求得：

$$\frac{b + W_L}{W_i + W_L} = \frac{1.490}{\left[ 1 - \frac{0.637M}{D^2(W_i + W_L)} \right]^{1/2}} \quad (16)$$

当 $\frac{M}{D^2(W_i + W_L)}$ 趋近于1.57时， $b$ 将趋近于无穷大，这时需重新设计。

图8由于线条较粗，计算时有一定误差。

计算机的大量计算表明，当 $\frac{M}{D^2(W_i + W_L)}$ 在1.1至1.4之间时，按曲线查出的计算结果与精确解符合较好，超出此范围时则误差较大，有些情况，在第二位数字上就可能出现误差。为得到更精确的计算值或为编写计算机程序，可用以下方法计算：

首先按式(17)求出 $\beta$ 值：

$$\frac{M}{D^2(W_i + W_L)} = \frac{\pi}{8} \frac{2\beta - \sin 2\beta}{\sin \beta - \beta \cos \beta} \quad (17)$$

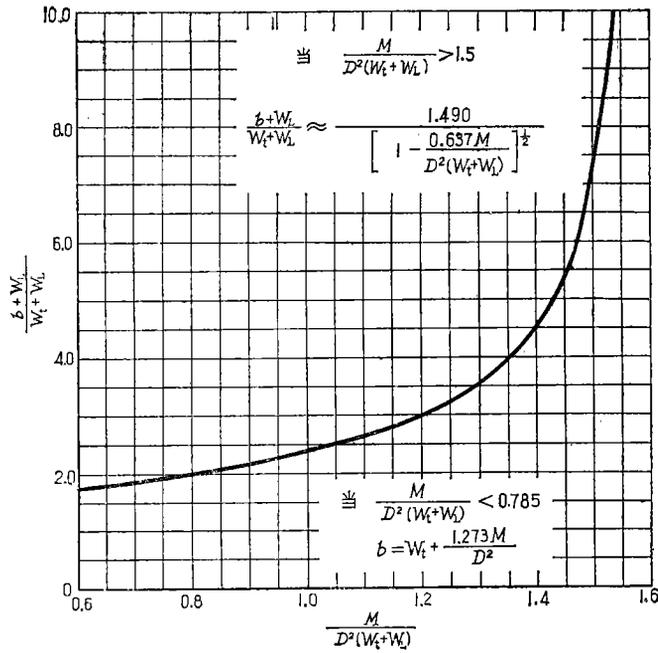


图 8

$\beta$  的单位为弧度，然后按式 (18) 求  $b$ ：

$$\frac{b + W_L}{W_t + W_L} = \frac{\pi(1 - \cos\beta)}{\sin\beta - \beta\cos\beta} \quad (18)$$

在利用式 (17) 求  $\beta$  时需用试算法，在第一次时可用以下的  $\beta$  值较为方便。

$$\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} < 1.0 \text{ 时,}$$

$$\beta = \pi - \sqrt{2 - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{D^2(W_t + W_L)}{M}} \quad (19)$$

$$\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} > 1.0 \text{ 时,}$$

$$\beta = \sqrt{10 \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{M}{D^2(W_t + W_L)} \right]} \quad (20)$$

当  $b$  求出后，可按下式求得压应力：

$$F = \frac{b}{12t} \quad (21)$$

式中： $F$ ——地震时罐壁所受的纵向压应力，磅/英寸<sup>2</sup>；

$t$ ——下层壁板的厚度，英寸。

### 三、罐壁临界压应力及其校核

附录 E 推荐用以下方法求临界许用压应力  $F_c$  值：

$$\text{当 } \frac{GHD^2}{t^2} > 10^6 \text{ 时,}$$

$$F_c = \frac{t10^6}{D} \quad (22)$$

$$\text{当 } \frac{GHD^2}{t^2} < 10^6 \text{ 时,}$$

$$F_c = \frac{t10^6}{2.5D} + 600\sqrt{GH} \quad (23)$$

式中： $F_c$ ——罐壁的最大许用纵向压应力，磅/英寸<sup>2</sup>。

以上算出的  $F_c$  值，在任何情况下不得大于  $0.5 F_{ty}$ （罐壁钢板规定的最低屈服极限，磅/英寸<sup>2</sup>）。

当  $F > F_c$  时或  $\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} > 1.57$ ，均表明在地震时，在设计预定的地震烈度

下, 罐壁将发生失稳。

式(22), (23)系由Lo.Crate和Schwartz根据圆柱形壳体在内压和轴向压力联合作用下经理论推导和试验得出的〔6〕。当罐径较小, 罐壁较厚时, 式(22), (23)不再适用而应用Miller的公式, 该式最大 $F_c$ 值为 $0.5F_{ty}$ 〔7, 8〕。

算例: 一台拱顶油罐, 直径80英尺(24.4米), 高40英尺(12.2米), 储液比重 $G=1.0$ , 腐蚀裕量为零, 油罐处于4度区, 建造地点处于二类场地土, 可取 $S=1.2$ , 罐壁圈板共5层, 每层宽度为96英寸(2.438米), 壁厚由下向上分别为0.46英寸(11.7毫米), 0.37英寸(9.4毫米), 0.27英寸(6.858毫米), 0.25英寸(6.35毫米), 0.25英寸(6.35毫米), 单位周长的罐壁重 $W_t=520$ 磅/英尺, 罐顶重 $W_r=50000$ 磅, 罐壁总重 $W_s=131000$ 磅(该油罐在API650附录A表A4中)。

计算:

储液总重 $W_T$ :

$$\begin{aligned} W_T &= \frac{\pi D^2 H}{4} \times 62.4 G \\ &= \frac{80^2 \times 40 \times \pi}{4} \times 62.4 \times 1 \\ &= 12.55 \times 10^6 \text{ 磅} \end{aligned}$$

式中62.4为每立方英尺的水重。

求 $C_1, C_2$ :

$$C_1 = 0.24$$

$$D/H = 80/40 = 2$$

由图1或式(5)可求出,

$$K = 0.59$$

由式(4)得:

$$T = KD^{1/2} = 0.59 \times 80^{1/2} = 5.3 \text{ 秒,}$$

因 $T > 4.5$ 秒, 故应用式(3)求 $C_2$ ,

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{1.35S}{T^2} = \frac{1.35 \times 1.2}{5.3^2} \\ &= 0.058 \end{aligned}$$

求 $W_1, W_2$ :

因 $D/H > 1.333$ , 故 $W_1/W_T$ 可按式(6)或查图2求得:

$$W_1/W_T = 0.54$$

$$\begin{aligned} W_1 &= 0.54W_T = 0.54 \times 12.55 \times 10^6 \\ &= 6.78 \times 10^6 \text{ 磅} \end{aligned}$$

$W_2$ 可按式(7)或查图2得:

$$W_2/W_T = 0.44$$

$$\begin{aligned} W_2 &= 0.44W_T = 0.44 \times 12.55 \times 10^6 \\ &= 5.52 \times 10^6 \text{ 磅} \end{aligned}$$

求 $x_1, x_2$ :

因 $D/H > 1.333$ , 故可按式(9)或按图4求得:

$$\frac{x_1}{H} = 0.375$$

$$x_1 = 0.375 \times 40 = 15 \text{ 英尺}$$

$x_2$ 可按式(11)或按图4求得:

$$\frac{x_2}{H} = 0.61$$

$$x_2 = 0.61 \times 40 = 24.4 \text{ 英尺}$$

求倾覆力矩 $M$ :

$$\begin{aligned} M &= ZI(C_1W_sx_s + C_1W_rH_t + \\ &\quad + C_1W_1x_1 + C_2W_2x_2) \\ &= 1.0 \times 1.0 \times (0.24 \times 0.131 \\ &\quad \times 10^6 \times 17.3 + 0.24 \times 0.05 \\ &\quad \times 10^6 \times 40 + 0.24 \times 6.78 \\ &\quad \times 10^6 \times 15 + 0.058 \times 5.52 \\ &\quad \times 10^6 \times 24.4) \\ &= (0.54 + 0.48 + 24.4 + 7.8) \\ &\quad \times 10^6 \\ &= 33.2 \times 10^6 \text{ 磅} \cdot \text{英尺} \end{aligned}$$

( $x_s$ 为罐壁的重心, 可求出 $x_s = 17.3$ 英尺)。

边缘板尺寸及 $W_L$ 的定。

试取 $t_b = 0.25$ 英寸, 材质ASTMA283C(相当我国钢号A3), 此种钢材的屈服强度 $F_{by} = 30000$ 磅/英寸<sup>2</sup>。

由式(14)

$$\begin{aligned} W_L &= 7.9t_b \sqrt{F_{by}GH} \\ &= 7.9 \times 0.25 \sqrt{30000 \times 1 \times 40} \\ &= 2160 \text{ 磅/英尺} \end{aligned}$$

计算出的 $W_L$ 值不得超过 $1.25GHD$ ,

即  $W_L < 1.25GHD$

$$1.25GHD = 1.25 \times 1 \times 40 \times 80 \\ = 4000 > 2160$$

满足以上条件。

除此条件外还需满足：

$$\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} < 1.57 \\ \frac{M}{D^2(W_t + W_L)} \\ = \frac{33.2 \times 10^6}{80^2 \times (520 + 2160)} \\ = 1.936$$

不能满足以上条件，需重新考虑边缘板的尺寸。

取边缘板厚度  $t_b = 0.375$  英寸，材质不变。

$$W_L = 7.9t_b \sqrt{F_{bv}GH} \\ = 7.9 \times 0.375 \sqrt{30000 \times 1 \times 40} \\ = 3245 \text{ 磅/英尺}$$

$$\frac{M}{D^2(W_t + W_L)} \\ = \frac{33.2 \times 10^6}{80^2 \times (520 + 3245)} \\ = 1.378 < 1.57$$

边缘板的宽度应  $\geq 0.0274 \frac{W_L}{GH}$ 。

$$0.274 \frac{W_L}{GH} \\ = 0.0274 \frac{3245}{1 \times 40} \\ = 2.22 \text{ 英尺}$$

最后确定：

边缘板厚度  $t_b = 0.375$  英寸；

边缘板最小宽度为 2.22 英尺；

材质为 A283C。

底层壁板地震时所受的压力及压应力的计算；

因  $\frac{M}{D^2(W_t + W_L)}$  在 0.785 至 1.5 之间，

故可按图 8 求得；

$$\frac{b + W_L}{W_t + W_L} = 4.17 \\ b = 4.17 \times (520 + 3250) - 3250$$

$$= 12470 \text{ 磅/英尺}$$

压应力  $F$  按式 (21) 求得；

$$F = \frac{b}{12t} = \frac{12470}{12 \times 0.46} \\ = 2260 \text{ 磅/英寸}^2$$

罐壁许用压应力计算及校核：

$$\frac{GHD^2}{t^2} = \frac{1 \times 40 \times 80^2}{0.46^2} \\ = 1.21 \times 10^6 > 10^6$$

故可按式 (22) 求许用压应力  $F_a$  值：

$$F_a = \frac{t \cdot 10^6}{D} = \frac{0.46 \times 10^6}{80} \\ = 5750 \text{ 磅/英寸}^2$$

因  $F < F_a$ ，故该油罐在地震时是安全的。

### 参 考 文 献

- [1] API650, Appendix A, Proposed Appendix P to API Standard 650 Seismic Design of Storage Tanks
- [2] API650, Appendix E, Seismic Design of Storage Tanks
- [3] G.W.Housner, Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 47 PP15~35, 1957, January
- [4] R. S. Wozniak and W. W. Mitchell, Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks, Proceedings Refining Department, API, 1978
- [5] Robert W. Miles, A.M., A.S.C.E. Practical Design of Earthquake Resistant Steel Reservoirs
- [6] H. Lo, H. Crane and E. B. Schwartz, Buckling of Thin-Walled Cylinders Under Axial Compression and Internal Pressure, NACA TN 2021, 1950
- [7] C. D. Miller, Buckling of Axially Compressed Cylinders, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 103, No. ST3, Proc. Paper 12823, PP695~721, 1977, March
- [8] Batdorf, S. B. A Simplified method of Elastic-Stability Analysis for Thin Cylindrical Shells, NACA Rept. 874 1947, March